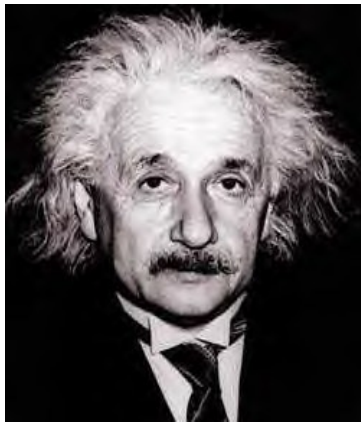


# Grundlegende Kenntnisse der Speziellen Relativitätstheorie

---



---

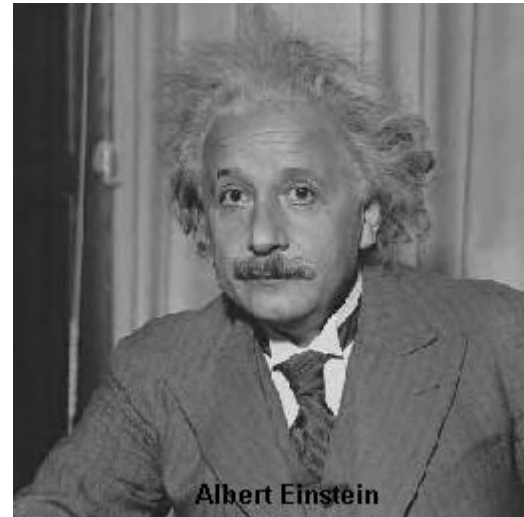
## Gliederung:

1. Einleitung: Einstein – Das Genie
2. Begriffsklärung
3. Entwicklung und Geschichte der Speziellen Relativitätstheorie
  - 3.1. Prinzipien
  - 3.2. Der Äther
  - 3.3. Das Michelson-Morley-Experiment
  - 3.4. Die Idee von Lorentz
  - 3.5. Der Widerspruch
  - 3.6. Vor der Speziellen Relativitätstheorie
4. Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie
  - 4.1. Längenkontraktion
  - 4.2. Zeitdilatation
  - 4.3. Dynamische Masse
  - 4.4. Masse-Energie-Beziehung
  - 4.5. Addition von Geschwindigkeiten
5. Zusammenfassung
6. Beweis der Theorie
7. Anwendung und Folgen der Theorie
8. Schlusswort
9. Quellen

## 1. Einleitung: Einstein – Das Genie

Die Biographie von Einstein stelle ich hier nur in Stichpunkten vor:

- 14(15).03.1879 (Ulm)
- jüdische Eltern (Herman Einstein, Pauline Einstein)
- 1880: Übersiedlung München
- 1889: - Eintritt Luitpoldgymnasium (ohne Abschlussexamen)
  - Mailand zu Eltern
  - machte Mittelschulabschluss
  - Besuch einiger anderer Schulen
- 1900: - Studienabschluss durch Diplomprüfung
- 1901: - Bürger Zürich
  - Hilfslehrer (Technikum in Winterthur / Knabenpensionat Schaffhausen)
  - erste eigene Publikation: *"Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen"*
- 1902: - Tod des Vaters
  - Beamter am Eidgenössischen Patentamt für geistiges Eigentum in Bern
  - Arbeit über die klassisch-statische Mathematik (bis 1905)
- 1903: - Ehe mit Mileva Maric
- 1904: - erster Sohn (Hans-Albert)
  - Prof. für Hydraulik an Universität Berkeley
  - Diskussion mit Arbeitskollegen (Besso, Sauter) über Idee der SRT
- 1905: - Dissertation (Doktorarbeit): *"Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen"*
  - Entdeckung des Lichtquants (1921 Nobelpreis)
  - Arbeit über Brownsche Bewegung
  - *Elektrodynamik bewegter Körper* (erste Arbeit über SRT)
- 1908: - Habilitation an Universität Bern
  - Wintersemester 08/09 erste Vorlesung *"Theorie der Strahlung"* (3 Hörer)
- 1909: - Naturforschertagung in Salzburg
  - Bekanntschaft mit bedeutendsten Physikern (Planck, Rubens, Wien, Pauli, Sommerfeld, Born)



- Wahl zum außerordentlichen Prof. der Uni Zürich
- gibt Arbeit in Patentamt auf
- 1910: - freundet sich mit Prof.-Kollegen an
- Geburt zweiter Sohn (Eduard)
- 1911: - ordentlicher Prof. in Prag
- erste Idee zur Allg. RT ( Einfluss von Schwerkraft auf Licht)
- 1912: - Berufung an die ETH Zürich
- Amtsantritt als ordentlicher Prof. für theoretische Physik
- 1913: - *"Entwurf einer Verallgemeinerten Relativitätstheorie und eine Theorie der Gravitation"*
- zusammen mit Marcel Großmann
- Wahl zum ordentlichen Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin
- Ernennung zum Direktor des Forschungsinstituts für Physik der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft
- 1914: - verlässt Zürich
- Frau bleibt mit Söhnen zurück
- 1915: - 3 wichtigsten Arbeiten: - *Zur Allgemeinen Relativitätstheorie*
- *Erklärung der Perihelbewegung des Merkurs aus der Allgemeinen Relativitätstheorie*
- *Feldgleichungen der Gravitation*
- 1916: - Vollendung der ART
- erste Pläne zur Verallgemeinerung der Gravitationstheorie
- 1917: - erstes gemeinverständliches Buch über SRT und ART
- 1919: - Beweis der ART bei Sonnenfinsternis durch Lichtablenkung
- gerichtliche Scheidung von Ehefrau → Ehe mit Elsa Einstein (Cousine)
- 1920: - Tod der Mutter
- 1921: - viele Vorträge in vers. Städten
- Nobelpreis für Entdeckung des photoelektrischen Effekt (1905)
- 1922: - Wahl in die „Kommission für intellektuelle Zusammenarbeit“
- 1923: - Gast bei der Holländischen Königsfamilie
- Austritt aus Völkerbund
- 1927: - Kur wegen Herzschwäche

- 1933: - Entzug der „deutschen Ehrenbürgerrechte“
  - Konfiskation seines Vermögens
  - Prämie auf Einsteins Kopf
- 1936: - Tod seiner zweiten Ehefrau
- 1941: - amerikanische Staatsbürgerschaft
- 1946: - *Grundlagen der Verallgemeinerung der Gravitationstheorie*
- 1948: - Tod der ersten Ehefrau
- 1950: - Verallgemeinerung der Gravitationstheorie
- 1952: - Angebot des Amts des Staatspräsidenten Israels → Absage
- 1953: - letzte Verfassung der Verallgemeinerung der Relativitätstheorie
- 1955: - Albert Einstein stirbt am 18. April (Princeton)

## 2. Begriffsklärung

Um wenigstens die Grundlegenden Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie zu verstehen muss man zuerst den wichtigsten Begriff dieser Theorie verstehen, das Inertialsystem: Ein Inertialsystem ist ein System, indem für einen freibeweglichen Körper die Trägheit gilt. Wem das zu kompliziert ist, kann sich den Begriff, grundlegend für die Spezielle Relativitätstheorie, als unbeschleunigtes Bezugssystem einprägen. Wirft man zum Beispiel einen Ball in die Luft, so ist das Bezugssystem des Balls die Erde. Genauso kann man aber auch sagen, dass der Ball das Bezugssystem der Erde ist... Denn schließlich ist ja alles relativ ;-) (dazu mehr unter 3.1 Prinzipien).

## 3. Entwicklung und Geschichte der Speziellen Relativitätstheorie

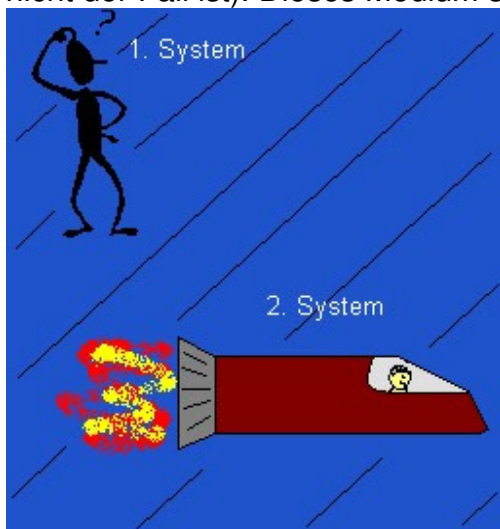
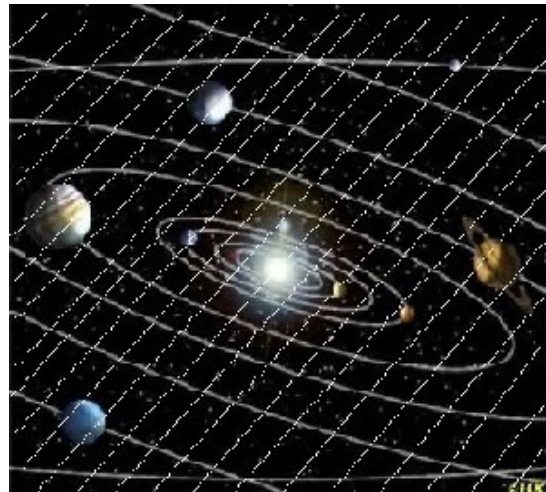
Einstein sagte einmal: „Die Argumente und Bausteine waren jahrelang bereit, allerdings ohne die endgültige Entscheidung vorher zu bringen.“ Was nichts anderes heißt, als dass Einstein schon errungenes Wissen geordnet und zur Speziellen Relativitätstheorie zusammengefasst hat. Er hatte ein Fach einen Blick für die Zusammengehörigkeit der verschiedenen Erkenntnis. Allerdings nicht nur er. Angeblich gab es auch andere Physiker, die an einer solchen Theorie arbeiteten, diese aber zu spät veröffentlichten. Die Spezielle Relativitätstheorie würde es heute also auch ohne Einstein geben (Hier muss man streng die Spezielle und die Allgemeine RT auseinander halten)

### 3.1. Prinzipien

Die Spezielle Relativitätstheorie beruht auf 2 grundlegenden Prinzipien. Erstens auf der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, die im Vakuum 299792,458 km/s beträgt (also ca. 300.000 km/s). Dabei ist es egal, ob sich die Lichtquelle relativ/bezüglich zum Beobachter bewegt oder nicht. Knipst man also zum Beispiel eine Taschenlampe an und steigt dann in eine Rakete und fliegt mit 0,5-facher Lichtgeschwindigkeit in die selbe Richtung in die auch die Taschenlampe zeigt, so wird man bei der Messung der Lichtgeschwindigkeit nicht etwa 150.000 km/s ( $300.000 \text{ km/s} * 2 = 150.000 \text{ km/s}$ ), sondern 300.000 km/s ablesen. Das zweite wichtige Prinzip ist das Galileische Relativitätsprinzip. Galilei entdeckte, dass man um eine Bewegung eines Körpers beschreiben zu können ein Bezugssystem, also ein Inertialsystem benötigt. Nimm man diese Aussage als richtig, so kann man postulieren, dass sich kein Objekt im ganzen Universum in absoluter Ruhe befindet, da stets eine Relativbewegung vorhanden ist. An dieser Stelle möchte ich noch eine kleine Zusatzinformation anbringen: Inertialsysteme, die sich relativ zueinander geradlinig und gleichförmig bewegen, sind für die Beschreibung eines Naturvorgangs gleichwertig.

### 3.2. Der Äther

Der Äther war vor der Speziellen Relativitätstheorie die Annahme der Existenz eines starren, im Raum ruhendes Medium, das dem Licht als Träger dient (Abb. rechts). Eine Analogie zum besseren Verständnis stellt hier die Beziehung zwischen Schall und Luft. Luft ist das Medium in dem, in dem sie der Schall fortbewegt. Man nahm also vor 1905 (Veröffentlichung der Speziellen Relativitätstheorie) fest an, dass das Licht ebenfalls ein Medium zum fortpflanzen/ausbreiten benötigt (was aber nicht der Fall ist). Dieses Medium sollte der



Äther darstellen, der das komplette Universum ausfüllen sollte. Der Äther würde aber nach dieser Definition gegen das in 3.1 Prinzipien postulierte widersprechen. Dort sagte ich, dass es kein Objekt/Medium im Universum gibt, welches sich in absoluter Ruhe befindet... Der Äther ist es, so war zu mindest die damalige Vorstellung. Einstein sprach dem Äther eine Sonderstellung zu, bis ihn vollends als überflüssig bezeichnete. Auf diese Erkenntnis kam er mit folgenden Gedankenexperiment: Man stelle sich zwei Systeme vor. Das erste System stellt der angeblich ruhende Äther dar und das zweite ein gleichförmig, geradliniges bewegte System (zum

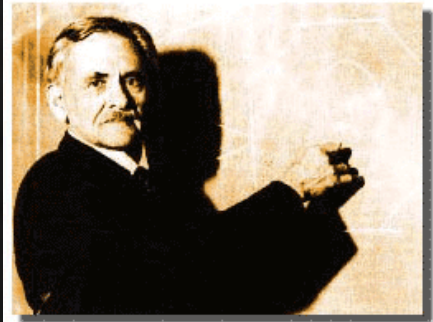
Beispiel eine Rakete). in beiden Systemen befindet sich je ein Beobachter. Zum besseren Verständnis soll die Abbildung auf der rechten Seite dienen. Der Beobachter im ersten System, also im Äther, wird nun behaupten, dass sich das zweite System, also die Rakete, bewegt, aber dass er selbst ruht. Aber genau mit dem selben Recht kann der Beobachter in der Rakete, also im zweiten System, behaupten, dass er sich in Ruhe befindet und sich das erste System (Äther) bewegt. Das bedeutet, dass der Bewegungszustand bzw. die absolute Ruhe des Äthers nicht feststellbar ist, was zur Aufgabe der Idee des Äthers führte. Zudem wird durch dieses Gedankenexperiment auch das zweite grundlegende Prinzip der Relativitätstheorie, das Galileische Relativitätsprinzip, bestätigt.

### 3.3. Das Michelson-Morley-Experiment

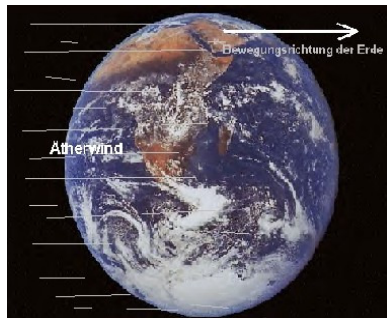
Das Michelson-Morley-Experiment ist nach seinen Erfindern Albert Michelson und Edward Williams Morley benannt, die dieses Experiment mit einer für damals außergewöhnlichen Genauigkeit durchführten (rechts sind beide zu sehen). Sie glaubten immer noch an die Existenz eines Äthers und wollten diesen mit ihrem Experiment nachweisen, indem sie die Relativgeschwindigkeit der Erde durch



E.W. Morley

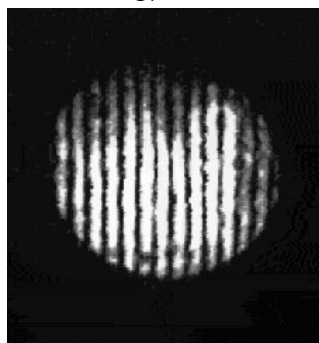
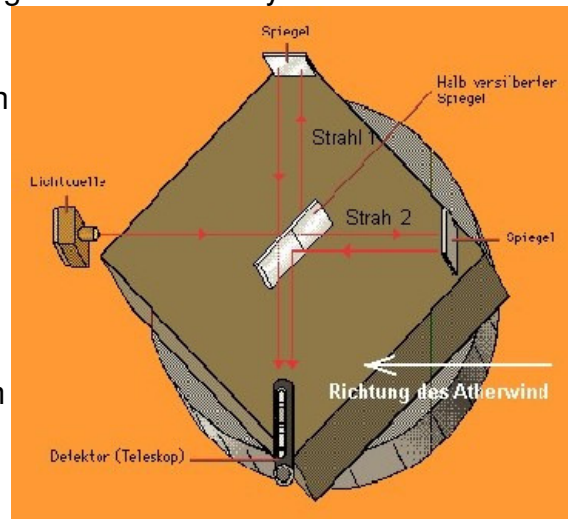


Albert Michelson



den Äther bestimmen. Um genau zu sein war die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit ihr primäres Ziel und der Beweis für die Existenz des Äthers nur eine direkte Folge dessen. Um nun die Experimentieranordnung und das Experiment an sich zu verstehen, muss man aber zuerst den Hintergrund dessen und die Überlegungen der beiden Physiker näher betrachten:

Michelson und Morley nahmen logischer Weise an, dass sich die Erde mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch den Äther bewegt, denn schließlich ist dieser ja angeblich in absoluter Ruhe und die Erde besitzt nun mal eine Geschwindigkeit mit der sie sich im Raum bewegt. Demnach müsste ein so genannter Ätherwind entstehen, wie sich analog dazu auch ein Fahrtwind ergibt, wenn man mit dem Fahrrad schnell einen Berg hinab fährt (linke Abbildung). So, da nun die Überlegungen einigermaßen klar sein sollten, können wir zur Durchführung der Experimente kommen.



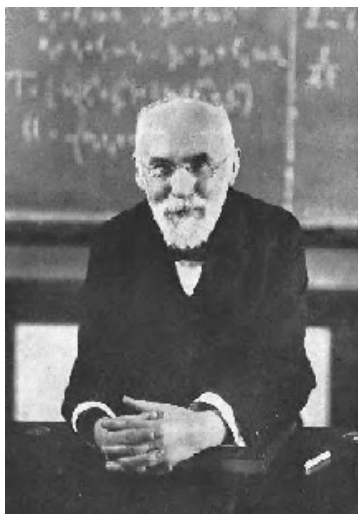
Bevor ich aber zur genaueren Erklärung komme ist es unbedingt notwendig, dass sie sich die schematische Skizze der Experimentieranordnung ansehen (rechte Abbildung). In der Realität war die Experimentieranordnung natürlich viel größer und komplizierter, da es nötig war, dass das Licht einen langen Weg zurücklegte. Das Experiment sah also wie folgt aus: Licht wurde von der Lichtquelle ausgesendet (dabei ist es wichtig zu wissen, dass Licht sowohl Eigenschaften von Teilchen, als auch von Wellen besitzt → der so genannte Wellen-Teilchen-Dualismus). Nachdem das Licht emittiert wurde trifft es auf einen halbversilberten Spiegel und wird dadurch in zwei Strahlen geteilt. Beide Strahlen legen nun einen gleich langen Weg zurück. Strahl 1 bewegt sich nun rechtwinklig zum Ätherwind und Strahl 2 entgegengesetzt des Ätherwinds. Was denken sie, welcher Strahl ist zuerst am Detektor (Teleskop)? Es ist der erste Strahl, denn dieser wird zwar leicht vom Ätherwind zur Seite "gedrückt", muss sich aber nicht wie der zweite Strahl direkt gegen den Ätherwind bewegen (Analogie: Ein Radfahrer ist langsamer, wenn der Wind von vorn kommt, als wenn der Wind von der

Seite kommt). In der Realität war die Experimentieranordnung natürlich viel größer und komplizierter, da es nötig war, dass das Licht einen langen Weg zurücklegte. Das Experiment sah also wie folgt aus: Licht wurde von der Lichtquelle ausgesendet (dabei ist es wichtig zu wissen, dass Licht sowohl Eigenschaften von Teilchen, als auch von Wellen besitzt → der so genannte Wellen-Teilchen-Dualismus). Nachdem das Licht emittiert wurde trifft es auf einen halbversilberten Spiegel und wird dadurch in zwei Strahlen geteilt. Beide Strahlen legen nun einen gleich langen Weg zurück. Strahl 1 bewegt sich nun rechtwinklig zum Ätherwind und Strahl 2 entgegengesetzt des Ätherwinds. Was denken sie, welcher Strahl ist zuerst am Detektor (Teleskop)? Es ist der erste Strahl, denn dieser wird zwar leicht vom Ätherwind zur Seite "gedrückt", muss sich aber nicht wie der zweite Strahl direkt gegen den Ätherwind bewegen (Analogie: Ein Radfahrer ist langsamer, wenn der Wind von vorn kommt, als wenn der Wind von der Seite kommt).



Seite bläst). Demnach kommen beide Strahlen auch zu einer unterschiedlichen Zeit am Detektor an, wodurch sich ein Interferenzmuster ergibt, da die verschiedenen Ankommzeiten zu einer Phasenverschiebung führt. So wäre es, wenn der Ätherwind und der Äther an sich existieren würde. Dem war aber nicht so. Das erwartete Interferenzmuster (Abbildung links) blieb aus! Das Experiment scheiterte! Somit war die NICHT-Existenz des Äthers bewiesen. Das bedeutet aber auch, dass die Strahlen zur selben Zeit am Detektor eintrafen, was heißt, dass die Lichtgeschwindigkeit unter allen Umständen konstant ist (Beweis des ersten grundlegenden Prinzips der Speziellen Relativitätstheorie: "Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeiten in allen Inertialsystemen").

### 3.4. Die Idee von Lorentz

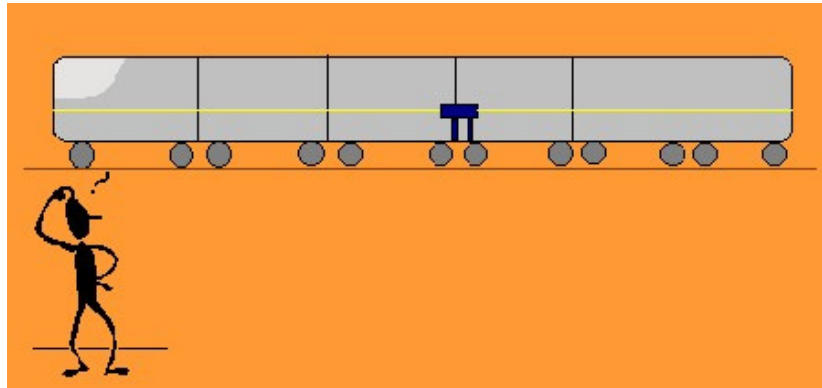


Sein kompletter Name lautet Hendrik Antoon Lorentz und er ist auf dem rechten Foto zu sehen. Er hatte sehr interessante Gedanken, die der Speziellen Relativitätstheorie schon recht nahe kamen. Er meinte das sich der komplette Teil der Apparatur des Michelson-Morley-Experiments der Bewegungsrichtung zeigt, sprich parallel zu Bewegungsrichtung liegt, verkürzt. Dies sollte genau in dem Maße geschehen, sodass der Strahl, der durch den Ätherwind "gebremst" wird (Strahl 2), einen kürzeren Weg zurück legt, um in selben Zeitpunkt wie der erste Strahl anzukommen. Aber warum greift man nicht einfach zum Maßstab und misst die die Verkürzung? Ganz einfach! Der Maßstab würde sich ebenfalls verkürzen, und zwar im gleichen Maße, wie die Apparatur, was ein Messen sinnlos macht, da man die gleichen Werte ablesen würde, als wenn man nicht in Bewegungsrichtung messen würde. Lorentz entwickelte aus diesem Grund Gleichungen, um den neuen Abstand bzw. die neue Länge zu messen. (Ich werde später, unter 4.1, 4.2, 4.3 und 4.5, näher auf die Gleichungen eingehen.). Zur Lorentz's Idee ist vielleicht noch zu sagen, dass der Physikers den falschen Ansatz für seine Behauptung der Verkürzung verwendete. Er wollte vielmehr die Idee des Ätherwinds retten, als eine neue Theorie über die Bewegung von Körper zu postulieren (wie es Einstein tat). Dennoch griff der junge Albert Einstein die Ideen von Lorentz auf, um 1905 seine Arbeit "Elektrodynamik bewegter Körper" zu veröffentlichen.



### 3.5. Der Widerspruch

Nun kann man sich folgendes vorstellen: Es sind zwei Inertialsysteme gegeben. Das erste Inertialsystem stellt ein geradlinig und gleichförmig dahinfahrender Zug dar, in deren Mitte sich ein Beobachter befindet.



Ebenfalls genau in der Mitte des Zugs steht eine Apparatur, die parallel zur Fahrriichtung in beide Seiten zum gleichen Zeitpunkt Licht emittiert. Das zweite System stellt der Bahndamm, mit einem dort befindlichen Beobachter, dar. Nun zum eigentlichen Widerspruch: Der Beobachter im Zug wird aussagen, dass das Licht zur gleichen Zeit am Zugesende bzw. am Zuganfang ankommt. Demnach ist die Lichtgeschwindigkeit konstant, da die Enden des Zugs gleichzeitig mit Licht erfüllt waren. Aber was sieht der Beobachter im zweiten Inertialsystem, also auf dem Bahndamm? Wird man ihm nach dem Geschehenem befragen, so würde er antworten, dass das Licht zuerst am Zugesende und dann am Zuganfang ankommt. Aber warum? Diese Frage ist ganz leicht zu beantworten. Der Zug bzw. der Zugesende fährt dem Licht davon und die das Zugesende dem Licht entgegen. Diese gesamte Argumentation macht Gebrauch von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen. Die Überschrift hieß "Widerspruch". Sie müssten schon erkannt haben warum. Die Beobachter in verschiedenen Inertialsystemen beurteilen die Gleichzeitigkeiten von Ereignissen unterschiedlich. Klar, auf den ersten Blick scheint das total unsinnig, aber es ist wirklich so! Man hätte als Titel also auch "Das Unglaubliche" anstatt "Der Widerspruch" wählen können ;-).

### 3.6. Vor der Speziellen Relativitätstheorie

Die Lösung des eben erläuterten Problem sagen die Physiker in einer Abänderung der Kinematik. In der klassischen Physik sind Raum und Zeit etwas Absolutes. Newton lehrte seiner Zeit: „ Die Zeit verfließt an sich und vermöge ihre Natur gleichförmig, und ohne Beziehung auf irgendeinen äußern Gegenstand.“ Für ihn war es selbstverständlich, dass ein Ereignis A auf der Erde gleichzeitig mit einem Ereignis B auf der Sonne geschieht. Es hieß vor der Speziellen Relativitätstheorie also: „ Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußern Gegenstand, stets gleich und unbeweglich.“ Ernst Mach (rechte Abbildung), ein bedeutender Physiker (beispielsweise in der Ballistik), kritisierte diese Sichtweise als einer der Ersten. Er sagte, dass diese (eben erwähnten) Sätze keine Bedeutung in der Naturwissenschaft haben, weil dessen Inhalt nicht sinnlich aufgezeigt werden kann. Einstein studierte die Schriften Mach's, was ihm einen enormen Anstoß zur Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie



gab. Ich habe nun nur einige allgemeine Dinge erwähnt, die zur Entstehung der Speziellen Relativitätstheorie von Einstein betragen. Nun zur Theorie selbst.

#### 4. Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie

Ich habe die Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie zum Nutzen des besseren Verständnisses in fünf Teile gegliedert: Die Längenkontraktion, die Zeitdilatation, die dynamische Masse (= die so genannten Lorentztransformationen), die Masse-Energie-Beziehung und die Addition von Geschwindigkeiten.

##### 4.1. Längenkontraktion

Hier handelt es sich um die Frage: Was passiert, wenn sich ein Körper mit einer gewissen Geschwindigkeit fortbewegt bzw. , wenn seine Geschwindigkeit erhöht wird? Die Erhöhung der Geschwindigkeit hat eine Längeverringerung in Bewegungsrichtung zur Folge. Dabei ist zu Beachten, dass die Spezielle Relativitätstheorie nicht den Vorgang der Änderung der Geschwindigkeit, also die Beschleunigung, betrachtet, sondern lediglich die die Veränderung der Länge in einem bestimmten Zeitpunkt bzw. sobald die Beschleunigung beendet ist. Die Formel zur Berechnung dieser Längenänderung lautet:

$$l = l' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$
$$l < l'$$

Dabei ist l stets kleiner sein als l'.

Hier einige Beispiele zur Verdeutlichung:

Ein Körper mit der Länge von einem Meter in Bewegungsrichtung (gemessen bei einer Relativgeschwindigkeit von Null), bewegt sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/s durch den Raum. Der Körper hat im vergleich zur Lichtgeschwindigkeit eine geringe, wodurch die Längenkontraktion mit dem Auge unmöglich zu sehen wäre.

geg.:  $v = 100 \text{ km/s}$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$l = 1 \text{ m} \cdot \sqrt{1 - \frac{(100 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}$$

$$\underline{l = 0,9999999444 \text{ m}}$$

Bewegt sich der Körper mit einer Geschwindigkeit, die der Lichtgeschwindigkeit schon näher kommt, sagen wir mit 250.000 km/s, so wäre die Verkürzung der Länge durchaus beobachtbar.

geg.:  $v = 250.000 \text{ km/s}$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$l = 1 \text{ m} \cdot \sqrt{1 - \frac{(250000 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}$$

$$\underline{l = 0,5527707984 \text{ m}}$$

Betrachten wir nun den unmöglichen Grenzfall (auf den Grund komm ich unter 4.3 und 4.4), dass er Körper sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

geg.:  $v = 300.000 \text{ km/s}$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$l = 1 \text{ m} \cdot \sqrt{1 - \frac{(300000 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}$$

$$\underline{l = 0 \text{ m}}$$

Wie zur erkennen ist, ist die mathematische Lösung bei dieser Geschwindigkeit eine Länge von Null in Bewegungsrichtung. Ich betone "mathematische Lösung", denn es ist, wie schon erwähnt, unmöglich diesen Fall empirisch zu untersuchen.

## 4.2. Zeitdilatation

Auch beider Zeit betrachten wir deren Eigenschaften bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Erhöht sich die Geschwindigkeit eines Körpers, so vergeht die Zeit für diesen Körper, von außen betrachtet (soll heißen, für einen Beobachter der sich in Ruhe zu dem Körper befindet), langsamer. Der Beobachter, oder die Person, die sich in dem Körper befindet wurde aber nichts von der Verlangsamung der Zeit in dem Körper merken. Vielmehr würde er bemerken, dass die Zeit außerhalb des Körpers langsamer vergeht. Denn schließlich handelt es sich hier um eine Relativbewegung des Körpers durch seinen Umgebung bzw. den Raum, durch man auch sagen könnte der Körper steht still und die Umgebung/der Raum bewegt sich

(Das ist übrigens der wesentliche Kern der Relativitätstheorie → Das Wahrgenommene hängt vom Ort des Betrachters ab.). Nun aber zur Formel zur Berechnung der so genannten Zeitdilatation:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$t > t'$

Dabei ist t stets größer als t'.

Beispiele:

Auch hier bewegt sich der Körper wieder mit 100 km/s durch den Raum. Für den Körper (oder die Person in dem Körper z.B. Rakete) vergeht eine Sekunde. Wieviel Zeit vergeht außerhalb des Körpers?

geg.:  $v = 100 \text{ km/s}$

$$t' = 1 \text{ s}$$

$$t = \frac{1 \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(100 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}}$$

$$\underline{t = 1,000000056 \text{ s}}$$

Auch hier sieht man wieder, dass der Wirkung der Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie, in dem Fall die Zeitdilatation, erst bei höheren Geschwindigkeiten zu beachten sind.

Nun für den fall, dass sich der Körper mit 250.000 km/s bewegt.

geg.:  $v = 250.000 \text{ km/s}$

$$t' = 1 \text{ s}$$

$$t = \frac{1 \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(250000 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}}$$

$$\underline{t = 1,809068067 \text{ s}}$$

Bei solch einer hohen Geschwindigkeit verdoppelt sich die Zeit schon fast.

Nun der unmögliche Grenzfall der Lichtgeschwindigkeit.

geg.:  $v = 300.000 \text{ km/s}$

$$t' = 1 \text{ s}$$

$$t = \frac{1 \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(300000 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}}$$

$t = \text{unendlich}$

Bei Lichtgeschwindigkeit bleibt die Zeit also stehen (zumindest nach der Mathematik).

### 4.3. Dynamische Masse

Erhöht sich die Geschwindigkeit eines Objekts, welches auch in der Ruhelage (d.h. das Objekt bewegt sich nicht relativ zum Beobachter) eine Masse besitzt, so erhöht sich diese. Dieser Erhöhung lässt sich wie folgt berechnen:

$$m_{\text{Dyn}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad m_{\text{Dyn}} > m_0$$

Dabei gilt, dass die dynamische Masse stets größer als die Ruhemasse ist.

Beispiele:

Ein Körper besitzt eine Ruhemasse von 10 kg und wieder eine Geschwindigkeit von 100 km/s.

geg.:  $v = 100 \text{ km/s}$

$$m(0) = 10 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Dyn}} = \frac{10 \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{(100 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}}$$

$$\underline{m = 10,00000056 \text{ kg}}$$

Der Zuwachs ist also verschwindend gering.

Bewegt sich der Körper hingegen mit 250.000 km/s, liegt auch hier ein Zunahme von fast 100 % vor.

$$\text{geg.: } v = 250.000 \text{ km/s}$$

$$m(0) = 10 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Dyn}} = \frac{10 \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{(250000 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}}$$

$$\underline{m = 18,09068067 \text{ kg}}$$

Betrachten man nun den gewohnten Grenzfall, so wird die Masse unendlich groß, was auch der Grund dafür ist, dass ein Körper mit einer vorhandenen Ruhemasse nie Lichtgeschwindigkeit erreichen kann.

$$\text{geg.: } v = 300.000 \text{ km/s}$$

$$m(0) = 10 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Dyn}} = \frac{10 \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{(300000 \text{ km/s})^2}{(300000 \text{ km/s})^2}}}$$

$$\underline{m = \text{unendlich}}$$

#### 4.4. Masse-Energie-Beziehung

Wie kann es sein, dass die Masse eines Körpers zunimmt, wenn er schneller wird? Woher soll denn die Masse plötzlich kommen? Die Antwort darauf liegt in der berühmten Formel verborgen, die fast jeder schon mal gesehen hat, aber sicher nicht jeder versteht.

$$E = mc^2$$

Diese Gleichung sagt aus, dass Energie äquivalent zueinander Masse ist. Das heißt, dass Masse Energie ist und Energie Masse. Masse ist also eine andere Zustandsform von Energie. Um nun also die Masse-Energie eines Körpers zu berechnen multipliziert man dessen Masse mit der Lichtgeschwindigkeit ins Quadrat. Wird nun die Geschwindigkeit eines Körper erhöht, so ist dazu Energie nötig. Teile dieser aufgebrauchten Energie werden dann in zusätzliche Masse des Körpers umgewandelt. Denken wir noch einmal an den Grenzfall der Lichtgeschwindigkeit und der unendlichen Masse, die der Körper dann haben würde. Dies ist auch deshalb unmöglich, weil die Masse bzw. die Energie (was ja eigentlich das gleiche ist) im Universum begrenzt und nicht unendlich ist. Will man aber ein Körper auf die Lichtgeschwindigkeit beschleunigen ist unendlich viel Energie nötig, da, ich sag es nochmals, die Masse unendlich groß wird. Nur Photonen (Lichtteilchen) sind in der Lage sich mit Lichtgeschwindigkeit zu bewegen, da sie keine Ruhemasse haben.

#### 4.5. Addition von Geschwindigkeiten

Geschwindigkeiten sind nicht einfach addierbar, denn es geht Geschwindigkeit durch die Umwandlung von Energie in Masse, nach  $E=mc^2$ , verloren. Man muss die Geschwindigkeiten also wie folgt zusammenrechnen:

$$v = \frac{v'+u}{\sqrt{1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}}}$$

Beispiele:

Wenn man eine Geschwindigkeit aus 10.000 km/s und 250.000 km/s zusammensetzt, so könnte man eine Geschwindigkeit von 260.000 km/s erwarten. Aber wie schon gesagt, dem ist nicht so:

geg.:  $v' = 10000 \text{ km/s}$

$u = 250000 \text{ km/s}$

$$v = \frac{10000 \text{ km/s} + 250000 \text{ km/s}}{\sqrt{1 + \frac{10000 \text{ km/s} \cdot 250000 \text{ km/s}}{(300000 \text{ km/s})^2}}}$$

$v = 256598,481 \text{ km/s}$

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Abweichungen bei größeren Geschwindigkeiten schon beträchtlich sein können.

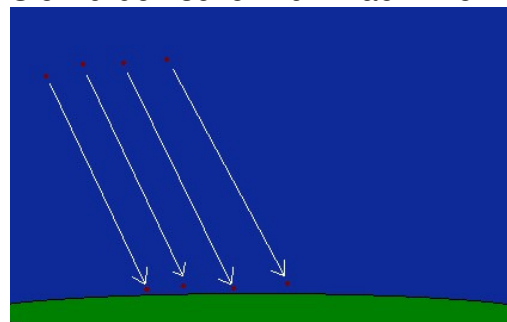
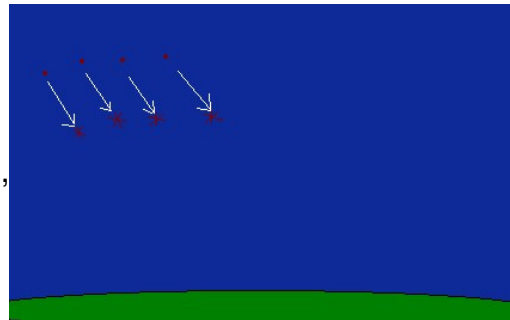


## 5. Zusammenfassung

Zusammengefasst kann man also sagen, dass es bei der Erhöhung der Geschwindigkeit zur Verkürzung der Länge, zur langsameren Zeit und zur Erhöhung der Masse kommt. Des Weiteren sagt die Spezielle Relativitätstheorie die Äquivalenz von Energie und Masse aus und, dass Geschwindigkeiten nicht einfach addierbar sind.

## 6. Beweis der Theorie

Nun möchte ich auch einen Beweis der Theorie an dieser Stelle anbringen. Aus dem All wird die Erde ununterbrochen mit Strahlung "beschossen", was zur Folge hat, dass in der Atmosphäre so genannte Myonen entstehen. Normalerweise ist die „Lebensdauer“ dieser Teilchen so gering, dass sie nie die Erdoberfläche erreichen könnten. Sie würden schon kurz nach ihrer Entstehung wieder zerfallen (Abbildung rechts).



Nur werden diese Myonen auf der Erdoberfläche detektiert. Wie kann das sein? Die Lösung steckt in der Speziellen Relativitätstheorie, um genau zu sein in der Zeitdilatation. Myonen bewegen sich mit sehr hohen Geschwindigkeiten, sodass die Zeitdilatation für sie "spürbar" wird. Dadurch vergeht für Myonen die Zeit relativ zu uns langsamer, sodass sie die Erdoberfläche erreichen können (linke Abbildung). Bei der Betrachtung des Problems wurde also die Spezielle Relativitätstheorie angewandt und bestätigt.

## 7. Anwendung und Folgen der Theorie

Die Spezielle Relativitätstheorie war maßgeblich an der Entwicklung der Physik und ihrer Theorien beteiligt. Durch sie sind sehr genau Theorien besonders in der Mikrowelt entstanden. Sie war zudem auch der Wegbereiter der Quantenmechanik. Mit der Speziellen Relativitätstheorie wurden viele Probleme der Physik gelöst, sowohl in der Mikrowelt (z.B. Problem der Myonen unter 6.), als auch in der Makrowelt. Des Weiteren beinhaltet die derzeit genaueste Theorie, die die Physik hervorgebracht hat, die Spezielle Relativitätstheorie, die QED (QuantenElektroDynamik), die die Vorgänge außerhalb des Atomkern beschreibt. Letzten Endes führte die Spezielle Relativitätstheorie zur Allgemeinen Relativitätstheorie, die, so schätzen es einige Physiker ein, ohne Einstein vielleicht bis heute nicht existieren würde, was man von der Speziellen Relativitätstheorie nicht behaupten kann.

## 8. Schlusswort

Hier ein kleines Zitat zum Abschluss: „..handelt es sich keineswegs um einen revolutionären Akt, sondern um eine natürliche Fortentwicklung einer durch Jahrhunderte verfolgbare Linie.“ Dies soll noch einmal verdeutlichen, dass Einstein nur das "zusammenpuzzelte", was vor ihm andere Physiker entdeckten und, dass die Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie unausweichlich war. Einstein studierte so Schriften bedeutender Forscher wie Ernst Mach, Heinrich Hertz, Gustav Robert Kirchhoff, Henri Poincaré und James Clark Maxwell und entwickelte deren Ideen weiter. Das war meine kurze Einführung in die Welt der Speziellen Relativitätstheorie. Ich möchte aber nochmals betonen, dass diese Theorie eigentlich noch um einiges komplizierter ist, und selbst wenn sie all das hier Geschriebene verstanden haben, und eigene Schlussfolgerungen daraus ziehen, so überblicken sie noch nicht die komplette Tiefe der Speziellen Relativitätstheorie.

## 9. Quellen

- Einsteins Relativitätstheorie (Gerald Kahn)
  - Einstein (Biographie von Johann Wickert)
  - Microsoft Encarta 2002
  - Notizen (vorher schon damit beschäftigt)
- Internet:**
- <http://planetquest.jpl.nasa.gov/technology/michelson.html>
  - <http://www.lgd.de/projekt/judentum/FischerEinstein/proframe.html>